نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۴، مرداد - شهریور ۱۳۹۹، ص. ۸۴۰-۸۲۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 14, Agu.-Sept. 2020, p. 829-840

# بررسی حرکت آلاینده‌ها در بستر آبرفتی یکی از سرشاخه‌های زنجان‌رود با استفاده از مدل عددی MODPATH

مهشید عباس‌پور[۱*]، سعید عباسی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۲۹

## چکیده

منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب، در سالیان اخیر علاوه بر مشکلات کمّی دچار افت کیفی و افزایش غلظت آلاینده‌ها شده‌اند. باتوجه‌به اهمیت و نقش کیفیت منابع آب در بهره‌برداری، شناخت آبخوان و عوامل تأثیرگذار در آن بسیار مهم و حائز اهمیت است. این مطالعه باهدف بررسی حرکت آلاینده‌ها با دیدگاه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در یکی از سرشاخه‌های زنجان‌رود انجام‌گرفته است. براین‌اساس دو نوع آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه در منطقه با دو روش دراستیک و HPI بررسی گردید. نتایج شاخص آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که خاک منطقه در کاهش غلظت فلزات سنگین مورد بررسی (سرب، کروم، کبالت، روی، نیکل) تأثیرگذار بوده و در جهت جریان آب زیرزمینی میزان غلظت کاهش می‌یابد. نتایج آسیب‌پذیری در حوضه نشان داد: شاخص دراستیک بیش از ۸۰درصد در رتبه‌بندی متوسط به کم و کم قرار گرفته است و شاخص HPI حوضه با میانگین ۳۰/۳ در رتبه‌بندی کم‌خطر قرار دارد، با وجود این حوضه پتانسیل توسعه آلودگی را دارد. به‌منظور تعیین مسیر حرکت آلاینده‌ها و نقش آبرفت منطقه، از مدل عددی MODPATH جهت شبیه‌سازی تحت تأثیر فرایند حرکت توده آب استفاده شد. پس از مدل‌سازی و واسنجی مدل MODFLOW شبیه‌سازی عددی منطقه برای مدت‌زمان سه سال انجام گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده چاه‌هایی که در مسیر جریان آب زیرزمینی و سطحی در مرکز حوضه قرار دارند، نسبت به چاه‌هایی که در اطراف بوده و از مرکز حوضه دورتر هستند طول حریم بیشتری دارند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان از الگوهای مختلفی جهت تعدیل و کاهش میزان انتقال آلاینده‌ها در این حوضه و سایر حوضه‌های منتهی به زنجان رود استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** آسیب‌پذیری، حرکت توده آب، غلظت آلاینده، HPI، MODPATH

## مقدمه

منابع آب زیرزمینی بعد از یخچال‌ها دومین منابع آب شیرین جهان هستند (۰/۸درصد از منابع آب شیرین کره زمین) که در واقع اولین و مهم‌ترین منابع آب شیرین در دسترس بوده از درجه اهمیت بالایی برخوردارند. با این شرایط یکی از مسائل مهم نگران‌کنندهٔ آب‌های زیرزمینی، آلودگی و تغییر خواص آب است. کنترل تغییرات کیفی در مقاطع زمانی مناسب علاوه بر آشکارسازی وضعیت کیفی منابع آب امکان ردیابی آلاینده‌ها را فراهم و پیشگیری آلودگی آبخوان را میسر می‌سازد. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب و کاربری اراضی است. استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری در آبخوان‌ها یکی از این رویکردها است. همچنین استفاده از مدل‌های جریان آب زیرزمینی و تکنیک‌های شبیه‌سازی نیز می‌تواند به‌عنوان یکی از راه‌های نظارت، کنترل و اعمال مدیریت مطرح باشد. مدل‌سازی آب زیرزمینی در تعیین و پیش‌بینی سطح ایستایی آب، غلظت یون‌های موجود در آب زیرزمینی، متغیرهای هیدرولوژی، اقلیم، متغیرهای کمّی و کیفی آب، تأثیر پوشش گیاهی و ... کارایی دارد؛ لذا استفاده از این رویکردها می‌تواند ابزارهای مدیریتی مناسبی را در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. همچنین شناخت رفتار آبخوان و پارامترهای مؤثر در حرکت آلاینده‌ها از منظر زیست‌محیطی می‌تواند چارچوب علاج بخشی را نیز نمایان سازد.

در زمینه مدل‌سازی آب زیرزمینی با نرم‌افزار یانگ و همکاران،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان
(*- نویسنده مسئول: Email:mahi.abbaspour@gmail.com)

مدل‌سازی عددی سه‌بعدی آب زیرزمینی را با رویکرد ارزیابی ریسک در تانگلیائو چین در محیط Visual MODFLOW مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این پژوهش که ارتفاع محاسبه شده آب کاملاً با داده‌های اندازه‌گیری شده سازگار است که نشان می‌دهد مدل مفهومی و پارامترهای مورد استفاده در مدل می‌تواند سیستم فیزیکی حوزه مطالعاتی را نشان دهد و پارامترهای کالیبره شده می‌تواند در نشان‌دادن ویژگی‌های آبخوان، تحلیل دینامیک جریان آب زیرزمینی و تغییرات سطح آب زیرزمینی مفید باشد (Yang et al., 2011). کاردان مقدم و جوادی وضعیت منابع آب زیرزمینی آبخوان سرایان شبیه سازی وضعیت کمی آبخوان با استفاده از مدل Modflow مورد بررسی قراردادند. پس از واسنجی مدل کمی، صحت‌سنجی انجام و پس از ارزیابی مناسب نتایج پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برای یک دوره‌ی ۱۰ ساله تا سال ۱۴۰۳ شبیه‌سازی شد. نتایج پیش بینی وضعیت کمی آبخوان نشان داد که با ادامه روند تخلیه و تغذیه، سطح آب زیرزمینی دارای افت و حداکثر میزان افت در بخش جنوب شرقی آبخوان سرایان به میزان ۴/۴ متر خواهد بود (Kardanmoghaddam et al., 2018).

در زمینه تحقیقات فلزات سنگین تیواری و همکارانش بیست و هشت نمونه آب سطحی از چهارده نقطه در نزدیکی معدن زغال‌سنگ غرب بوکارو، هند جمع‌آوری کردند. غلظت فلزات سنگین با استفاده از طیف‌سنج جرمی پلاسما (ICP-MS) و شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) برای تعیین نوسانات فصلی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. مقادیر HPI کمتر از شاخص آلودگی بحرانی بود. بااین‌حال، در بسیاری از قسمت‌ها، غلظت آهن بالاتر از حد مطلوب WHO (2006)و استاندارد آب آشامیدنی هند (BIS 2003) در هر دو فصل بود که قبل از مصرف داخلی نیاز به تصفیه دارد (Tiwari et al.,2015). نصرآبادی (۲۰۱۵) به‌منظور ارزیابی خطر فلزات سنگین در رودخانه هراز، شاخص آلودگی ($C_d$) و شاخص HPI را در آب رودخانه بررسی کرد. نتایج مطالعات او نشان داد مقادیر این دو شاخص در آب رودخانه کمتر از مقادیر بحرانی است. بالاکریشنان و همکارش با استفاده از شاخص HPI آب‌های زیرزمینی اطراف نواحی ساحلی خلیج مانار و تنگه پالک در هند نشان دادند میانگین مقادیر HPI بیشتر از ۱۰۰ می‌باشد که نشان دهنده آلودگی بحرانی حوضه است (Balakrishnan and Ramu, 2016).

در زمینه بررسی آسیب‌پذیری با روش دراستیک، ایلینا گابریل برابن[1] آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در منطقه بارلند را با شاخص دراستیک مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه ضمن برآورد شاخص دراستیک و تعیین کران‌های آن در محدوده همبستگی بین مقدار شاخص نهایی دراستیک با میزان آلودگی در آبخوان یا مقدار غلظت نیترات انجام گرفت که نتایج حاکی از رابطه رگرسیونی بالای غلظت نیترات با نتایج مدل می‌باشد (Breabăn and Paiu, 2012). زقبی و همکاران به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی تونس با استفاده از شاخص دراستیک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پارامترهای تغذیه آبخوان، هدایت هیدرولیکی و عمق تا سطح آب زیرزمینی از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار در برآورد شاخص آسیب‌پذیری بوده و شاخص به‌دست‌آمده هم‌پوشانی و همبستگی بالایی با غلظت نیترات در آبخوان دارد (Zghibi et al., 2016). کاردان مقدم و همکاران با بررسی شاخص آسیب‌پذیری GALDIT و DRASTIC در آبخوان ساحلی آستانه–کوچصفهان ضمن آنالیز حساسیت پارامترهای این دو شاخص، وزن و رتبه‌های دو شاخص را با توجه به همبستگی با غلظت TDS واسنجی نمودند. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد شاخص آسیب‌پذیری ساحلی GALDIT به طور قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به روش DRASTIC برتری دارد (Kardan Moghadam et al., 2017).

هدف از این پژوهش بررسی عددی تأثیر آلاینده‌های موجود در اثر نفوذ در خاک و آب زیرزمینی یکی از سرشاخه‌های زنجان رود است که با استفاده از نمونه‌گیری‌های انجام شده صحت‌سنجی می‌شود و هدف نهایی پیش‌بینی وضعیت منطقه با ادامه روند موجود است. بر همین اساس و به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان از شاخص دراستیک و به‌منظور ارزیابی غلظت فلزات سنگین از شاخص HPI استفاده گردید. تلفیق این دو شاخص با مدل عددی MODPATH حریم کیفی و نقش آبرفت را نشان می‌دهد. باتوجه‌به اهمیت حضور زنجان رود و چاه‌های برداشتی اطراف آن جهت تأمین آبیاری کشاورزی منطقه همچنین وجود شهرک صنعتی در همان حوضه بررسی آسیب‌پذیری آبخوان و اطمینان از عدم آلودگی آب به فلزات سنگین ضرورت انجام این تحقیق را نشان می‌دهد که برای انجام آن به تلفیق روش‌های ذکر شده در شکل ۱ نیاز است. همچنین باتوجه به نتایج حاصل از آسیب‌پذیری، احتمال ورود آلودگی در حوضه برای تصمیم‌گیری مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی جهت توسعه بخش‌های آبخوان کمک می‌کند.

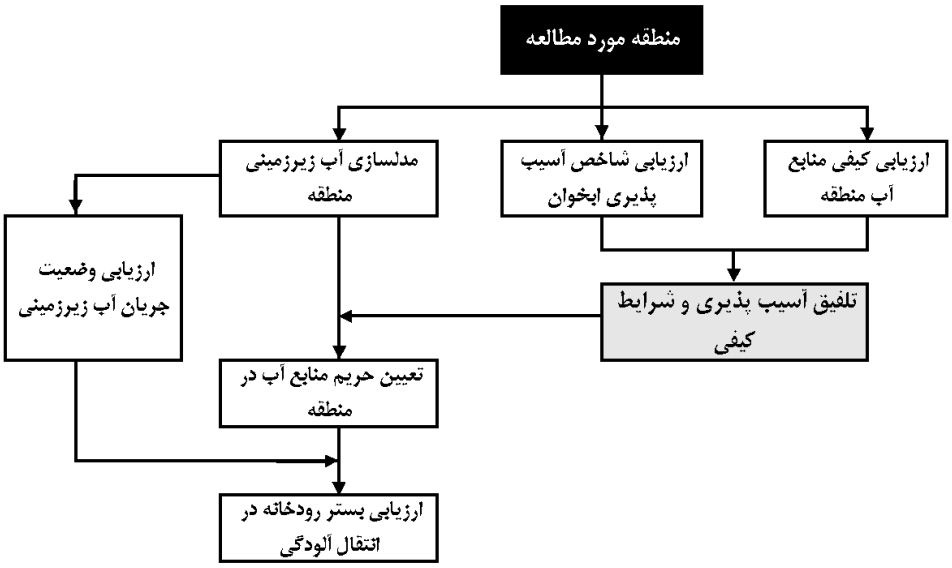
## مواد و روش‌ها

### روش تحقیق

به‌منظور بررسی حرکت آلاینده‌ها در بستر آبرفتی رودخانه بر اساس شکل ۱ روش تحقیق طرح‌ریزی گردید. براین‌اساس باتوجه‌به انتخاب یک سرشاخه از رودخانه‌های منتهی به زنجان رود به‌عنوان ناحیهٔ مورد تحقیق پس از مدل‌سازی کمّی جریان آب زیرزمینی در مسیر رودخانه به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان زنجان منطقه موردمطالعه با استفاده از دو شاخص دراستیک و HPI پرداخته شد. با

1- Iuliana Gabriela Breabăn

تلفیق نتایج حاصل از آسیب‌پذیری و نمونه‌برداری کیفی فلزت سنگین با درنظرگرفتن میزان حریم منابع آب با مدل MODPATH، ارزیابی وضعیت بستر رودخانه در انتقال آلودگی مشخص می‌گردد.




**شکل ۱- روش تحقیق**

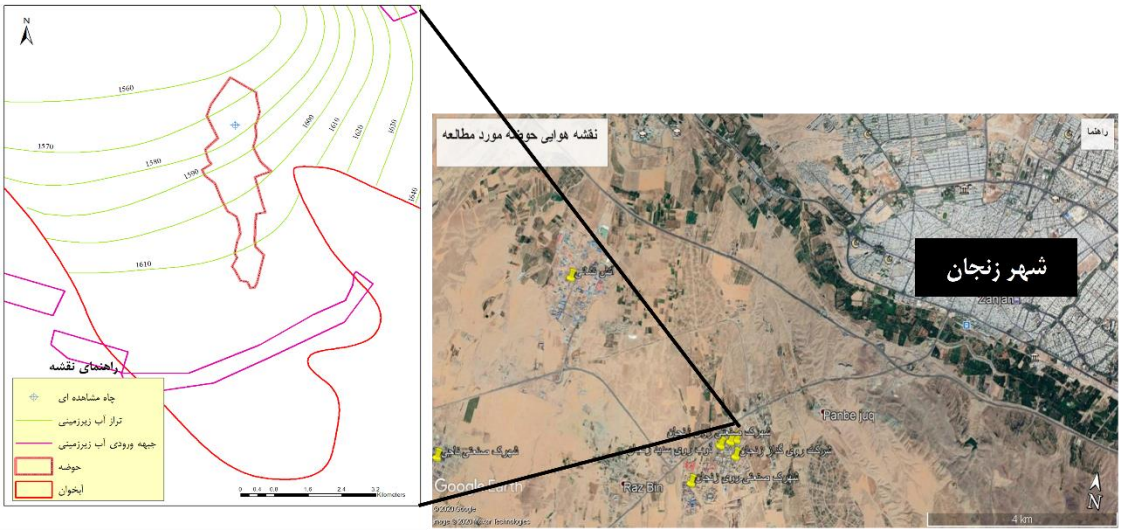
**منطقه مورد مطالعه**

محدودهٔ مطالعاتی زنجان در قسمت مرکزی و شمال غربی کشور، و مابین ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. با مساحت ۴۶۶۷ کیلومترمربع یکی از زیر حوضه‌های سفیدرود می‌باشد. این محدوده شامل حوضهٔ آبریز رودخانه زنجان رود تا تلاقی با قزل‌اوزن است. زنجان رود از ارتفاعات ۲۷۰۰ متری اطراف سلطانیه سرچشمه می‌گیرد. وسعت ناحیهٔ دشتی و ناحیهٔ ارتفاعات حوضهٔ زنجان رود به ترتیب برابر ۱۹۱۰ کیلومتر مربع و ۲۷۵۷ کیلومتر مربع است (گزارش‌های بیلان منابع آب، ۱۳۹۰).

باتوجه‌به هدف این پژوهش که بررسی حرکت آلاینده‌ها در بستر آبرفتی با استفاده از مدل عددی و با استفاده از داده‌های کیفی فرضی است، یکی از سرشاخه‌های رودخانه زنجان رود واقع در بخش جنوب غربی شهر زنجان انتخاب شد. در این منطقه ۸ چاه فرض شد و از ۵ پارامتر کیفی سرب، کروم، نیکل، کبالت و روی جهت تحلیل استفاده شد. نتایج اولیه و موقعیت چاه‌های کیفی در منطقه مورد تحلیل در جدول ۱ ارائه شده است.

**جدول ۱- موقعیت و نتایج آزمایش‌های فلزات سنگین (pbb)**

| ردیف | نام منبع | مختصات | | فلزات سنگین | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | UTM X | UTM Y | سرب | کروم | نیکل | کبالت | روی |
| ۱ | چاه ۱ | ۲۷۰۰۰۸ | ۴۰۵۷۶۵۵ | ۲/۴۹ | ۴/۴۶ | ۰/۳ | ۰/۳۳ | ۲۲/۱۳ |
| ۲ | چاه ۲ | ۲۶۹۷۴۹ | ۴۰۵۷۷۵۸ | ۰/۲۵ | ۰/۴ | ۰/۰۷ | ۰/۰۲ | ۷ |
| ۳ | چاه ۳ | ۲۶۹۸۷۱ | ۴۰۵۸۵۲۲ | ۱/۵ | ۲/۳ | ۰/۱۳ | ۰/۲۱ | ۱۵/۲ |
| ۴ | چاه ۴ | ۲۶۹۸۸۸ | ۴۰۵۹۸۸۹ | ۰/۱۲ | ۰/۱ | ۰/۴ | ۰/۱ | ۲/۴ |
| ۵ | چاه ۵ | ۲۶۹۲۵۶ | ۴۰۶۰۸۷۳ | ۰/۰۹ | ۰/۰۷ | ۰/۲ | ۰/۰۸ | ۲ |
| ۶ | چاه ۶ | ۲۶۹۷۴۰ | ۴۰۶۲۰۸۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۳ | ۰/۰۵ | ۰/۲ | ۰/۸ |
| ۷ | چاه ۷ | ۲۷۰۱۲۱ | ۴۰۶۲۵۸۱ | ۰/۰۴ | ۰/۰۳ | ۰/۰۶ | ۰/۱۵ | ۰/۷ |
| ۸ | چاه ۸ | ۲۷۰۰۶۰ | ۶۰۶۲۷۷۳ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۱ | ۰/۲ | ۰/۶ |




**شکل ۲- منطقهٔ مورد تحلیل**

## شاخص آسیب‌پذیری

عبارت آسیب‌پذیری در هیدروژئولوژی برای اولین‌بار توسط مارگات[1] در سال ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفته است ( Vrba and Zaporozec 1974+ ,). آسیب‌پذیری آبخوان را امکان نفوذ و پخش آلودگی از سطح زمین به سطح آب مخازن طبیعی در شرایط طبیعی تعریف می‌شود. به‌طورکلی آسیب‌پذیری از نظر مفهوم به دو دستهٔ ذاتی و ویژه تقسیم می‌گردد. آسیب‌پذیری ذاتی وابسته به خصوصیات آبخوان و آسیب‌پذیری ویژه به نوع آلاینده‌ها در آبخوان معطوف می‌گردد. پارامتر زمان نیز بخش مهمی از تعریف ارزیابی آسیب‌پذیری است که بستگی به عوامل مختلف دارد. در این مطالعه از دو شاخص آسیب‌پذیری دراستیک به‌عنوان آسیب‌پذیری ذاتی و شاخص HPI برای فلزات سنگین منطقه به‌عنوان آسیب‌پذیری ویژه استفاده گردیده است.

## شاخص دراستیک

در شاخص آسیب‌پذیری دراستیک از ۷ پارامتر شامل عمق تا سطح ایستابی (D)، تغذیه (R)، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (A)، مواد تشکیل‌دهنده خاک (S)، توپوگرافی (T)، اثر منطقهٔ غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) جهت بررسی و آنالیز استفاده می‌شود که معمولاً با استفاده از نرم‌افزارهای GIS ترسیم و در نهایت شاخص نهایی ارزیابی می‌شود.

پس از تهیهٔ پارامترهای موردنیاز برای ارزیابی آسیب‌پذیری به روش دراستیک اقدام به تهیهٔ نقشه آسیب‌پذیری شده است. در این روش از تلفیق پارامترهای هفت‌گانه بر اساس رابطه (۱) شاخص آسیب‌پذیری به دست می‌آید که در آن r ارزش کلاسه‌بندی شدهٔ هر پارامتر و w وزن هر یک از پارامترها است.

$$\text{DRASTIC-Index} = D_rD_w + R_rR_w + A_rA_w + S_rS_w + T_rT_w + I_rI_w + C_rC_w \quad (۱)$$

تلفیق این پارامترها با استفاده از رابطهٔ (۱) مقدار آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی را در مقابل آلودگی در تک‌تک سلول‌ها به‌صورت طیف رنگی نشان می‌دهد. عدد دراستیک در محدوده‌ای بین ۸۰ تا ۱۴۰ کلاس‌بندی شده است که عدد کوچک‌تر از ۸۰ نشان‌دهنده آسیب‌پذیری خیلی کم و عدد بیشتر از ۱۴۰ نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالا منطقه می‌باشد.

## شاخص آسیب‌پذیری HPI

عناصر سنگین و ترکیبات آن بسیار سمی بوده و می‌توانند سیستم ایمنی بدن انسان را مختل کنند. به‌منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین به‌ویژه در منابع آب زیرزمینی به‌عنوان منبع تأمین آب شرب و کشاورزی در کشورهای خشک و نیمه‌خشک چندین شاخص معرفی شده که یکی از شاخص‌های مهم در این مورد شاخص HPI است. این شاخص ابزار مناسبی برای ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی به فلزات سنگین است. شاخص آلودگی فلزات سنگین یک روش برای رتبه‌بندی کیفیت آب بر اساس فلزات سنگین است. این شاخص بیانگر آلودگی یک منطقه ناشی از غلظت فلزات سنگین است و بر اساس پارامترهای مورد آزمایش به‌صورت رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود:

$$HPI = [\sum_1^n Q_i \times W_i]/\sum_1^n W_i \quad (۲)$$

دراین‌رابطه $Q_i$ مقدار زیر شاخص عنصر مورد ارزیابی پارامتر i ام و $W_i$ نسبت وزنی عناصر پارامتر i ام از عناصر فلزات سنگین است. مقدار زیر شاخص $Q_i$ با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

1- Margat

$$Qi = \sum_1^n [|(M_i - I_i)|]/[|(S_i - I_i)|] \times 100 \quad (۳)$$

دراین‌رابطه مقدار $M_i$ غلظت قرائت‌شدهٔ عنصر مورد ارزیابی برحسب ppb مربوط به i امین پارامتر است. مقدار $I_i$ مقدار غلظت ایده‌آل پارامتر و $S_i$ مقدار استاندارد i ام پارامتر است. اگر مقدار این شاخص از مقدار ۱۰۰ بیشتر باشد، آلودگی آب به فلزات سنگین بالا است. اگر مقدار شاخص برابر با ۱۰۰ باشد آلودگی فلزات سنگین در آستانه مخاطره و اگر کمتر از ۱۰۰ باشد آلودگی آب به فلزات سنگین کم در نظر گرفته می‌شود.

### مدل‌سازی آب زیرزمینی

### معرفی مدل MODFLOW

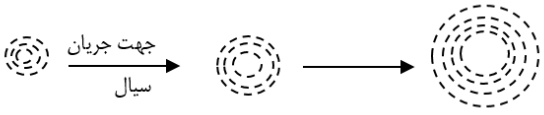
مدل MODFLOW اولین‌بار در سال ۱۹۸۴ تحت عنوان مدل جریان سه‌بعدی تفاضل‌های محدود[1] ارائه گردید. این مدل قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای مختلف آبخوان و عوارض مختلف مؤثر بر آبخوان را داراست که شامل موارد زیر می‌شود: آبخوان‌های آزاد و تحت‌فشار، گسل‌ها، لایه‌های تحت‌فشار که با مواد ریزدانه محصور شده‌اند، لایه‌های تحت‌فشار، جریان آب زیرزمینی و تغییرات ذخیره، رودخانه‌هایی که با آبخوان در تبادل هستند، زهکش‌ها و چشمه‌هایی که آب را از آبخوان تخلیه می‌کنند، جریان‌های زودگذری که با آبخوان در تبادل هستند، مخازنی که با آبخوان در تبادل هستند، تغذیه‌ی حاصل از بارش و آبیاری، تبخیر – تعرق و چاه‌های تخلیه و تغذیه می‌باشند.

### مدل MODPATH

به‌منظور بررسی و شبیه‌سازی وضعیت محل حرکت آلاینده‌ها در مسیر آبرفتی و تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی از مدل عددی MODPATH استفاده می‌گردد. مدل MODPATH بر اساس فرایند همرفت، حرکت آلاینده‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. همرفت فرایندی است که انتقال آلودگی یا مواد محلول فقط توسط جریان سیال صورت می‌گیرد و جهت و سرعت انتقال آلودگی بر جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی منطبق است (شکل ۳). یعنی سرعت انتقال آلودگی یا مواد محلول معادل سرعت حرکت آب زیرزمینی می‌باشد. زمانی که آب زیرزمینی ساکن باشد، پدیده همرفت عمل نمی‌کند و بنابراین انتقال آلودگی ناشی از مکانیسم همرفتی برابر صفر خواهد بود. در محیط‌هایی که نفوذپذیری زیاد باشد (مثل ماسه و گراول)، فرایند همرفت مهم‌ترین فرایند انتقال آلودگی خواهد بود.

### تهیه مدل مفهومی منطقه طرح

جهت شبیه‌سازی نحوه انتقال و حرکت آلاینده‌ها در سفره آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار GMS یک مدل مفهومی تدوین شد. اجزای تشکیل‌دهنده این مدل مفهومی و نحوهٔ استقرار آنها در ادامه شرح داده شده‌اند:




**شکل ۳- پدیده همرفت در انتقال آلودگی**

الف) مرز حوضه: این مرز باتوجه‌به خصوصیات استراگرافی منطقه و موقعیت ۸ چاه نمونه‌برداری در نرم‌افزار GIS استخراج شد.

ب) چاه‌های بهره‌برداری: باتوجه‌به آخرین گزارش‌های بیلان منابع آب زیرزمینی و اطلاعات منابع آب محدوده مطالعاتی زنجان، موقعیت و میزان بهره‌برداری از این منابع استخراج شد.

ج) جبهه‌های ورودی و خروجی زیرزمینی: باتوجه‌به تراز آب زیرزمینی آبخوان زنجان و مجزا کردن این خطوط در حوضه موردمطالعه جهت جریان آب زیرزمینی استخراج و بر اساس آن جبهه‌های ورودی و خروجی به‌صورت GHB[2] در مدل مفهومی تعریف شد.

د) تغذیهٔ آبخوان: باتوجه‌به شبکه آبراهه و متوسط بارش درازمدت در این منطقه میزان تغذیه از سطح محاسبه و به‌صورت لایه پوششی Rechargeدر مدل مفهومی اعمال شد.

ه) شبکه‌بندی آبخوان: باتوجه‌به استفاده از روش حل تفضلات محدود، از شبکه‌بندی مربعی شکل با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر در داخل حوضه موردمطالعه استفاده شد.

و) استراگرافی حوضه: باتوجه‌به نقشه رقومی ارتفاع، تراز اولیه آب زیرزمینی و سنگ بستر آبخوان، این مقادیر برای حوضه استخراج و در مدل مفهومی وارد شد.

براین‌اساس در شکل ۴ نمای کلی از مدل مفهومی حوضهٔ موردمطالعه ارائه شده است.

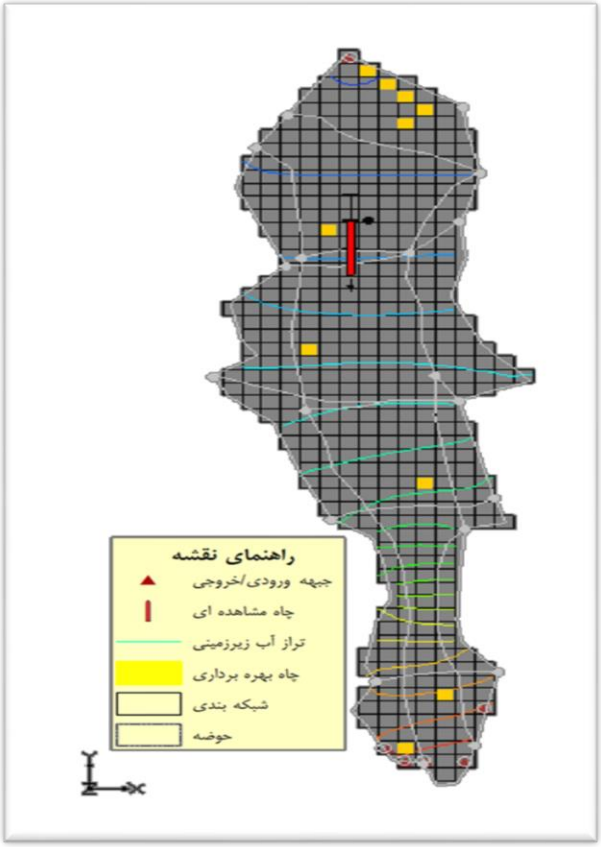
## بحث و نتایج

### ارزیابی شاخص دراستیک

مدل آسیب‌پذیری دراستیک از مجموع هفت لایه تشکیل شده که هر یک از آنها نقش مهمی در میزان آسیب‌پذیری آبخوان می توانند داشته باشند. هر چه عمق آب زیرزمینی بیشتر باشد زمان طولانی‌تری لازم است تا آلودگی به سفره برسد. در ضمن در این زمان بخش غیراشباع در کاهش میزان آلودگی نقش مهمی دارد.

1- Three-Dimentional Finite-Difference Flow Method

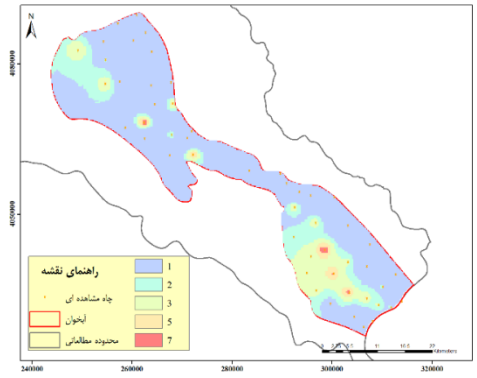
2- General-Head Boundary



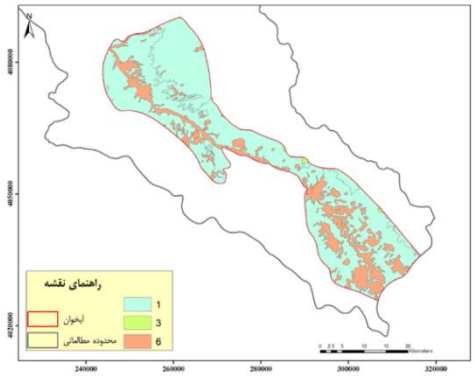

**شکل ٤- مدل مفهومی حوضه**

یکی از پارامترهایی که باعث جابه‌جایی و انتقال آلاینده‌ها به سفره‌ی آب زیرزمینی می‌شود حرکت از سطح زمین به‌طرف سفره‌ی آب زیرزمینی است که روند این کار توسط تغذیه که ناشی از نفوذ آب در خاک به هر شکل ممکن است انجام می‌شود. سه فاکتور محیط آبخوان، خاک و محیط غیراشباع هرکدام در یک بخش آبخوان سبب انتقال آلودگی یا نگهداشت آلودگی می‌شوند. وجود داشتن یک لایه خاک شنی در سطح سبب افزایش سرعت انتقال و کاهش جذب سطحی می‌شود (لایهٔ رسی اثر عکس دارد). وجود لایه‌ها و سازندهای زمین‌شناسی در منطقه و در محدودهٔ غیراشباع نیز در انتقال آلودگی یا جذب آلودگی و خود پالایی نقش دارند. هرچه سازند زمین‌شناسی دارای تخلخل بیشتر و قدرت جذب بالاتری باشد، باتوجه‌به جدول ارائه شده توسط آلر وزن بیشتری می‌گیرد که یعنی تأثیر بیشتری دارد (Aller et al.,1987). شیب زمین در نحوهٔ ورود آلودگی به سفره نقش دارد؛ هر چه شیب بیشتر باشد امکان نفوذ توسط بارندگی یا رواناب کمتر می‌شود. هدایت هیدرولیکی که معمولاً برحسب متر بر روز تعریف می‌شود، امکان و سرعت ورود آلاینده به سفره را نشان می‌دهد. به‌منظور تهیهٔ یک نقشه آسیب‌پذیری مناسب در محیط GIS اندازهٔ پیکسل ۱۰۰×۱۰۰ متر برای کلیهٔ هفت لایه انتخاب و نقشه‌های آسیب‌پذیری بر اساس آن به‌صورت شکل ۵ تهیه گردید.

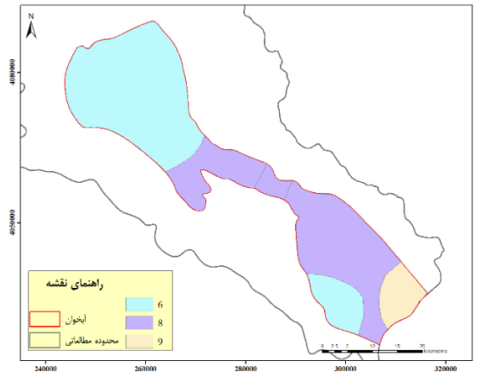
پس از تلفیق ۷ پارامتر شاخص آسیب‌پذیری دراستیک، میزان آسیب‌پذیری در آبخوان و منطقهٔ طرح به دست آمد. در جدول ۲ مساحت و درصد پوشش وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان زنجان و منطقهٔ طرح و شکل ۶ نقشهٔ نهایی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک را در آبخوان و در شکل ۷ برای منطقهٔ طرح نشان می‌دهد.



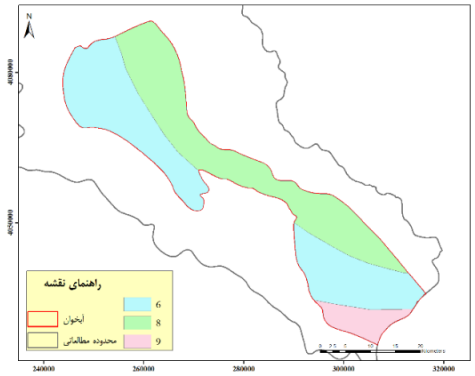

الف- عمق آب زیرزمینی



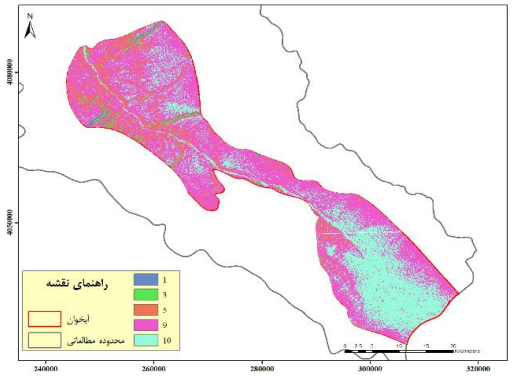

ب- تغذیه آبخوان



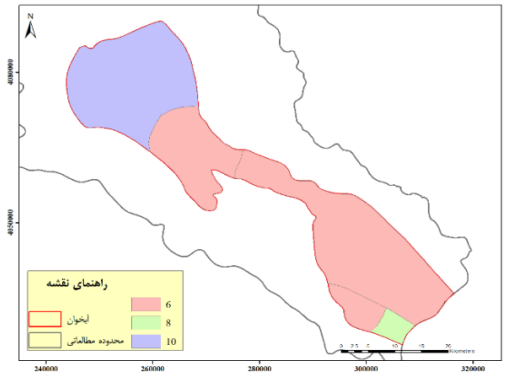

ج- محیط آبخوان



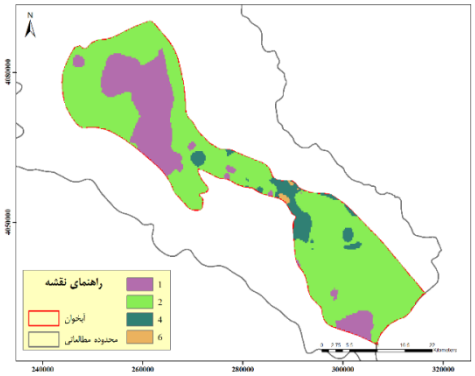

د- خاک




ه- شیب




و- محیط غیراشباع

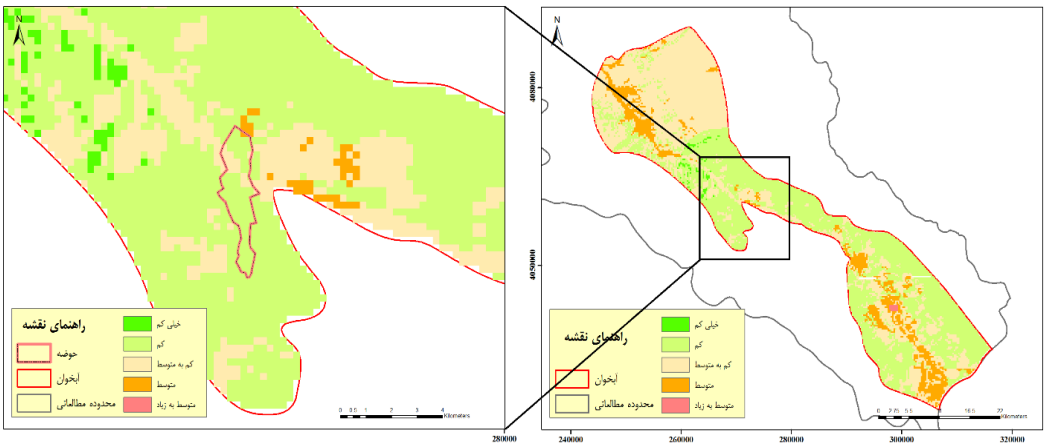



ز- هدایت هیدرولیکی

**شکل ۵- پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان زنجان**

جدول ۲- رتبه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان زنجان

| کلاس | آبخوان زنجان | | منطقه طرح | | کلاس‌بندی |
|---|---|---|---|---|---|
| | مساحت (کیلومتر مربع) | درصد مساحت (٪) | مساحت (کیلومتر مربع) | درصد مساحت (٪) | |
| آسیب‌پذیری خیلی کم | ۶.۹ | ۰.۶ | | | <۸۰ |
| آسیب‌پذیری کم | ۵۲۲.۵ | ۴۵.۴ | ۳.۴۳ | ۷۶ | ۹۹-۸۰ |
| آسیب‌پذیری کم به متوسط | ۴۹۴.۸ | ۴۳.۲ | ۱.۰۱ | ۲۲ | ۱۱۹-۱۰۰ |
| آسیب‌پذیری متوسط | ۱۲۰.۷ | ۱۰.۵ | ۰.۰۶ | ۲ | ۱۳۹-۱۲۰ |
| آسیب‌پذیری متوسط به بالا | ۱.۵ | ۰.۲ | | | >۱۴۰ |




شکل ٦- آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان زنجان

شکل ۷- آسیب‌پذیری دراستیک در منطقه طرح

## ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری HPI

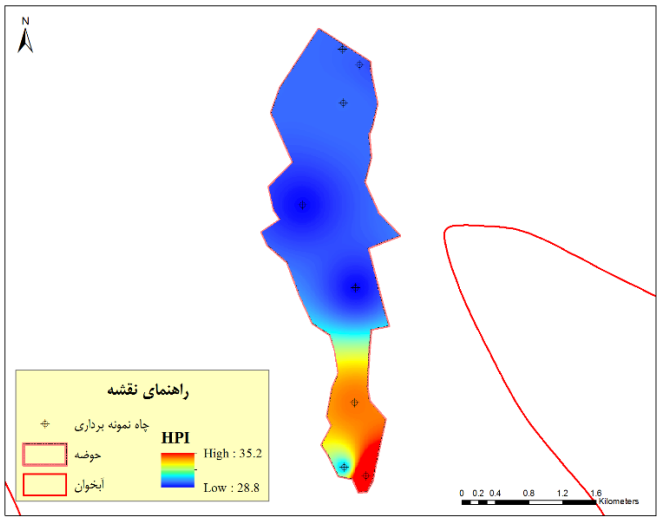
به‌منظور محاسبه مقدار شاخص HPI با استفاده از استانداردهای بین‌المللی، با درنظرگرفتن وزن و زیر شاخص، مقدار شاخص برای هر پارامتر کیفی در جدول ۳ و برای هر چاه فرض شده در جدول ۴ محاسبه گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مطابق شکل ۸ پهنه‌بندی شاخص HPI در سطح حوضه مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۳- برآورد شاخص HPI(pbb)

| شاخص کیفی / پارامتر کیفی | غلظت متوسط | مقدار استاندارد | مقدار ایده‌آل | Qi | Wi | MAC | Wi*Qi | HPI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سرب | ۰.۵۷ | ۱۰۰.۰۰ | ۵۰.۰۰ | ۹۸.۸۶ | ۰.۰۲ | ۵۰.۰۰ | ۱.۹۸ | |
| کروم | ۰.۹۳ | ۱۰.۰۰ | | ۹.۲۵ | ۰.۰۲ | ۵۰.۰۰ | ۰.۱۹ | |
| نیکل | ۰.۱۶ | ۷۰.۰۰ | ۲۰.۰۰ | ۳۹.۶۷ | ۰.۰۵ | ۲۰.۰۰ | ۱.۹۸ | |
| کبالت | ۰.۱۸ | ۱۰.۰۰ | | ۱.۸۴ | ۰.۰۵ | ۲۰.۰۰ | ۰.۰۹ | |
| روی | ۶.۳۵ | ۱۵۰۰۰.۰۰ | ۵۰۰۰.۰۰ | ۴۹.۹۴ | ۰.۰۰۰۰۲ | ۵۰۰۰.۰۰ | ۰.۰۱ | |
| | | HPI-Index | | | ۰.۱۴ | | ۴.۲۵ | ۳۰.۳۰ |

جدول ٤- برآورد مقدار شاخص HPI برای هر چاه نمونه‌برداری

| چاه نمونه‌برداری | HPI | چاه نمونه‌برداری | HPI | چاه نمونه‌برداری | HPI | چاه نمونه‌برداری | HPI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳۵.۲ | ۳ | ۳۲.۱ | ۵ | ۲۸.۸ | ۷ | ۲۹.۱ |
| ۲ | ۲۹.۸ | ۴ | ۲۸.۸ | ۶ | ۲۹.۳ | ۸ | ۲۹.۳ |




**شکل ۸- پهنه‌بندی شاخص HPI در حوضه مورد مطالعه**

بررسی شاخص HPI در سطح حوضه نشان می‌دهد که در جهت حرکت آب زیرزمینی مقدار شاخص کاهش می‌یابد و این کاهش شاخص به مفهوم بهبود وضعیت کیفی شاخص است. بهبود وضعیت باتوجه‌به حرکت آب زیرزمینی و خود پالایی خاک منطقه باعث کاهش غلظت فلزات سنگین نیز شده است.

ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و شاخص HPI نشان می‌دهد که این دو شاخص ارتباط معنادار خاصی ندارند. به‌طوری‌که شاخص HPI از بالادست به‌طرف پائین‌دست حوضه کاهش می‌یابد اما در ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک باتوجه‌به ماهیت داده‌های مؤثر این وضعیت ارزیابی نمی‌گردد. ماهیت داده‌های مورد ارزیابی در شاخص HPI بر اساس غلظت فلزات سنگین است که به طور ویژه برای این حوضه باتوجه‌به نمونه‌های موجود می‌باشد. اما در شاخص آسیب‌پذیری دراستیک ماهیت به نوع پارامترهای مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی است که به خصوصیات ذاتی حوضه بستگی دارد. پارامترهای هیدروژئولوژیکی اثر مستقیمی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی داشته و اثر جهت جریان آب زیرزمینی عملاً در این شاخص لحاظ نمی‌شود.

## ارزیابی حرکت آلاینده‌ها در مسیر آبرفتی

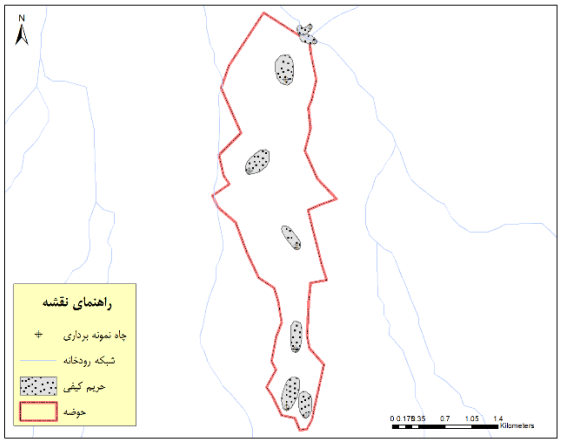
به‌منظور تعیین حریم کیفی ۸ چاه موردنظر در حوضهٔ مورد مطالعه از مدل MODPATH استفاده شد. لازمهٔ شبیه‌سازی با استفاده از این مدل، استفاده از مدل MODFLOW است. براین‌اساس شبیه‌سازی در مدل MODFLOW انجام گرفت و به‌منظور تحلیل مدل باتوجه‌به سطح کم منطقه و تعداد چاه‌های مشاهده‌ای، واسنجی بر اساس حداقل اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انجام گرفت. بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی و شبیه‌سازی مدل به مدت ۳ سال با گام زمانی فصلی انجام گرفت. حداکثر میزان خطای دوره شبیه‌سازی کمتر از ۱ متر در نظر گرفته شد. به‌منظور ارزیابی نحوه حرکت آلاینده‌ها و استفاده از یک مدل عددی که بتواند نتایج مناسبی را ارائه دهد از نتایج پهنه‌بندی کیفی و نحوه پراکنش و تغییرات غلظت کیفی نیز استفاده شد.

سرعت پراکنش و شکل توده‌ای حرکت آلاینده‌ها به خصوصیات لایهٔ آبدار ارتباط داشته و هرچه میزان سرعت آب بیشتر باشد، تودهٔ مخروطی جریان سریع‌تر پخش می‌شود. سرعت خطی جهت انتقال آلاینده‌ها متوسط تابعی از هدایت هیدرولیکی سازند آب زیرزمینی، تخلخل سازند و گرادیان هیدرولیکی در امتداد جریان است. همچنین باتوجه‌به خصوصیات خاک، چنانچه آلاینده وارد فرایند رسوب‌دهی، انحلال یا جذب شود، سرعت انتقال آن با سرعت متوسط آب زیرزمینی یکسان نمی‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که چاه‌هایی که در مسیر اصلی جریان سطحی و زیرزمینی حوضه قرار دارند دارای طول پراکنش بیشتری نسبت به چاه‌هایی هستند که در حاشیه حوضه قرار دارند. همچنین چاه‌هایی که در مرکز حوضه قرار دارند عرض کمتری نسبت به چاه‌های حاشیه حوضه دارند. براین‌اساس در شکل ۹ پهنه‌های حریم با استفاده از مدل MODPATH ارائه شده است.

تحلیل مسیر حرکت جریان در محیط آبرفتی در حوضه موردمطالعه نشان می‌دهد که چاه‌هایی که در مرکز حوضه قرار دارند باتوجه‌به مسیر جریان دارای سرعت انتقال بیشتری نسبت به سایر چاه‌ها بوده و مسیر حرکت در جهت جریان بیشتری داشته و حرکت شعاعی یا عرضی آنها کمتر است نسبت به چاه‌هایی که نسبت به مرکز حوضه فاصله دارند.

بررسی اجمالی نشان می‌دهد که خاک منطقه باعث کاهش اثر غلظت فلزات سنگین شده و در فاصله حدود ۸۰۰ متری در بالادست

و ۶۰۰ متری در پایین‌دست، حداکثر میزان اثربخشی است. براین‌اساس پس از این فاصله غلظت فلزات سنگین که به‌صورت رسوبات در مسیر جریان آب زیرزمینی حرکت می‌کنند، به شدت کاهش می‌یابد؛ اما غلظت باتوجه‌به منابع تغذیه‌کننده این عناصر در سطح حوضه پخش شده است.




**شکل ۹- پهنه‌های حریم کیفی با استفاده از مدل MODPATH**

## نتیجه‌گیری

آسیب‌پذیری آبخوان آبرفتی زنجان با استفاده از شاخص دراستیک ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بیشتر سطح آبخوان در وضعیت آسیب‌پذیری کم و کم تا متوسط قرار داشته و در سطح حوضه نیز بیش از ۷۵ درصد در وضعیت آسیب‌پذیری کم قرار دارد.

باتوجه‌به نتایج کیفی فلزات سنگین در سطح ۸ چاه در حوضه موردمطالعه، شاخص HPI که مربوط به آسیب‌پذیری فلزات سنگین است مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اگرچه حاکی از پائین بودن آسیب‌پذیری توسط این شاخص است، اما روند تغییرات این شاخص نشان داد که در مسیر جریان آب زیرزمینی از بالادست به پایین‌دست مقدار این شاخص افزایش دارد.

ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان و حوضه آبریز موردمطالعه نشان داد که این حوضه پتانسیل توسعه را داشته و میزان آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی آن کم تا متوسط است.

پس از ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه، به‌منظور تعیین مسیر حرکت آلاینده‌ها و نقش آبرفت منطقه، از مدل عددی استفاده شد. مدل MODPATH جهت شبیه‌سازی میزان انتقال آلاینده‌ها که براثر Advection منتقل می‌شوند مورد بررسی قرار گرفت. براین‌اساس ابتدا با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی عددی منطقه برای مدت‌زمان سه سال انجام گرفت و پس از تأیید مدل، شبیه‌سازی انجام و نتایج نشان داد که بافت آبرفتی منطقه باعث شده تا مسیر انتقال آلاینده‌ها در مدت‌زمان ۳ سال حداکثر یک کیلومتر می‌باشد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده چاه‌هایی که در مسیر جریان آب زیرزمینی و سطحی در مرکز حوضه قرار دارند طول حریم بیشتری را نسبت به چاه‌هایی که در اطراف بوده و از مرکز حوضه دورتر هستند، دارند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان از الگوهای مختلفی جهت تعدیل و کاهش میزان انتقال آلاینده‌ها در این حوضه و سایر حوضه‌های منتهی به زنجان رود استفاده کرد. باتوجه‌به اهمیت رودخانه زنجان رود و نقش آلاینده‌ها در اثر توسعه، می‌توان از راهکارهای سازه‌ای مثل ایجاد سد زیرزمینی در مرکز زیر حوضه‌ها و ایجاد موانع جهت افزایش زمان و مسیر حرکت استفاده کرد.

## منابع

شرکت مدیریت منابع آب ایران. مطالعات بهنگام سازی بیلان منابع آب حوزه آبریز سفیدرود بزرگ مختوم به سال آبی ۹۰-۸۹. جلد پنجم ارزیابی منابع آب، ضمیمه شماره ۴: بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی زنجان (کد ۱۳۰۴)

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett G. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential using Hydrogeologic Settings. U.S. Environmental Protection Agency. Ada. Oklahom.

Almasri, M.N. and Kaluarachchi, J.J. 2007. Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds. Journal of Hydrology. 343(1-2): 211-229.

Balakrishnan, A. and Ramu, A. 2016. Evaluation of

2018. Mapping Groundwater Vulnerability Zones in Eogenetic Karst Catchment Using Particle-tracking Method. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 159. No. 1: 012011). IOP Publishing.

Nasrabadi, T. 2015. An IndexApproach toMetallic Pollution in RiverWaters. International Journal of Environmental Research. 9(1): 385-394.

Tiwari, A.K., De Maio, M., Singh, P.K. and Mahato. M.K. 2015. Evaluation of surface water quality by using GIS and a heavy metal pollution index (HPI) model in a coal mining area, India. Bulletin of environmental contamination and toxicology. 95(3):304-310.

Vrba, I., and Zaporozec, A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, Vol. 16: 131.

Yang, Q., Lun, W., and Fang, Y. 2011. Numerical modeling of three dimension groundwater flow in Tongliao (China). Procedia Engineering, 24, 638-642.

Zghibi, A., Merzougui, A., Chenini, I., Ergaieg, K., Zouhri, L. and Tarhouni, J. 2016. Groundwater vulnerability analysis of Tunisian coastal aquifer: An application of DRASTIC index method in GIS environment. Groundwater for Sustainable Development. 2:169-181.

heavy metal pollution index (HPI) of ground water in and around the coastal area of Gulf of Mannar Biosphere and Palk Strait. Journal of Advanced Chemical Sciences. 331-333.

Breabăn, I.G. and Paiu, M. 2012. Application of DRASTIC model and GIS for evaluation of aquifer vulnerability: study case Barlad city area. Water resources and wetlands. P:14-16.

Fioreze, M. and Mancuso. M.A. 2019. MODFLOW and MODPATH for hydrodynamic simulation of porous media in horizontal subsurface flow constructed wetlands: A tool for design criteria. Ecological Engineering. 130:45-52.

Ghaderpoori, M. 2018. Heavy metals analysis and quality assessment in drinking water–Khorramabad city.Iran. Data in brief. 16:685.

Kardan Moghaddam, H., Jafari, F. and Javadi, S. 2017. Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. Hydrological Sciences Journal. 62(1):137-146.

Kardan Moghaddam, H., Banihabib, M.E. and Javadi, S. 2018. Quantitative sustainability analysis of aquifer system (case study: South Khorasan-Birjand aquifer). Journal of Water and Soil. 31(6).

Klaas, D.K.S.Y., Imteaz, M.A., Arulrajah, A., Sudiayem, I., Klaas, E.M.E. and Klaas, E.C.M.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 14, Agu.-Sept. 2020, p. 829-840

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۴، مرداد - شهریور ۱۳۹۹، ص. ۸۴۰-۸۲۹

# Investigation of Transportation of Pollutants in Alluvial Bed of One of Zanjan River Branches Using MODPATH

**M. Abbaspour*[1], S. Abbasi[2]**
Recived: Mar.08, 2020 Accepted: Apr.17, 2020

## Abstract

Groundwater resources,as one of the most important resources of water supply, have been faced with the qualitative decline and increasing the concentration of pollutants in addition to a quantitive problems in recent years. According to the importance of the role of water supply quality in exploitation, recognizing the aquifer and factors affecting it is very important. This study was conducted to investigate the movement of pollutants with the view of assessing aquifer vulnerability in one of the branches of Zanjan River. Accordingly, two types of intrinsic and special vulnerability in the region were investigated by two methods of drastic and HPI. The results of vulnerability index show that the soil of region is effective in decreasing the concentration of heavy metals under study (lead, chromium, nickel, cobalt, zinc) and the concentration reduces in the direction of groundwater flow. The results of vulnerability index showed that the Drastic index is more than 80% in the medium to low and low ranking and the HPI index of the basin with an average of 30.3 is in the low risk, however, this basin has the potential to develop pollution. In order to determine the direction of pollution and the role of alluvial in the area MODPATH numerical model was used to simulate under the influence of the advection process in order to determine the direction of pollutants movement and the role of alluvium of the region. The numerical simulation of the region was carried out for three years after modeling and calibrating the MODFLOW model. Based on the results, the wells located along the groundwater and surface water flow path in the center of the basin have longer length compared to the wells that are around and far from the center of the basin. Based on the results, different patterns can be used such as creating barriers to modify and reduce the amount of pollutants transfer in this basin and other basins leading to Zanjan River.

**Keywords**: Advection, Contaminant concentration, HPI, MODPATH, Vulnerability

1- M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
(*- Corresponding Author Email: mahi.abbaspour@gmail.com )